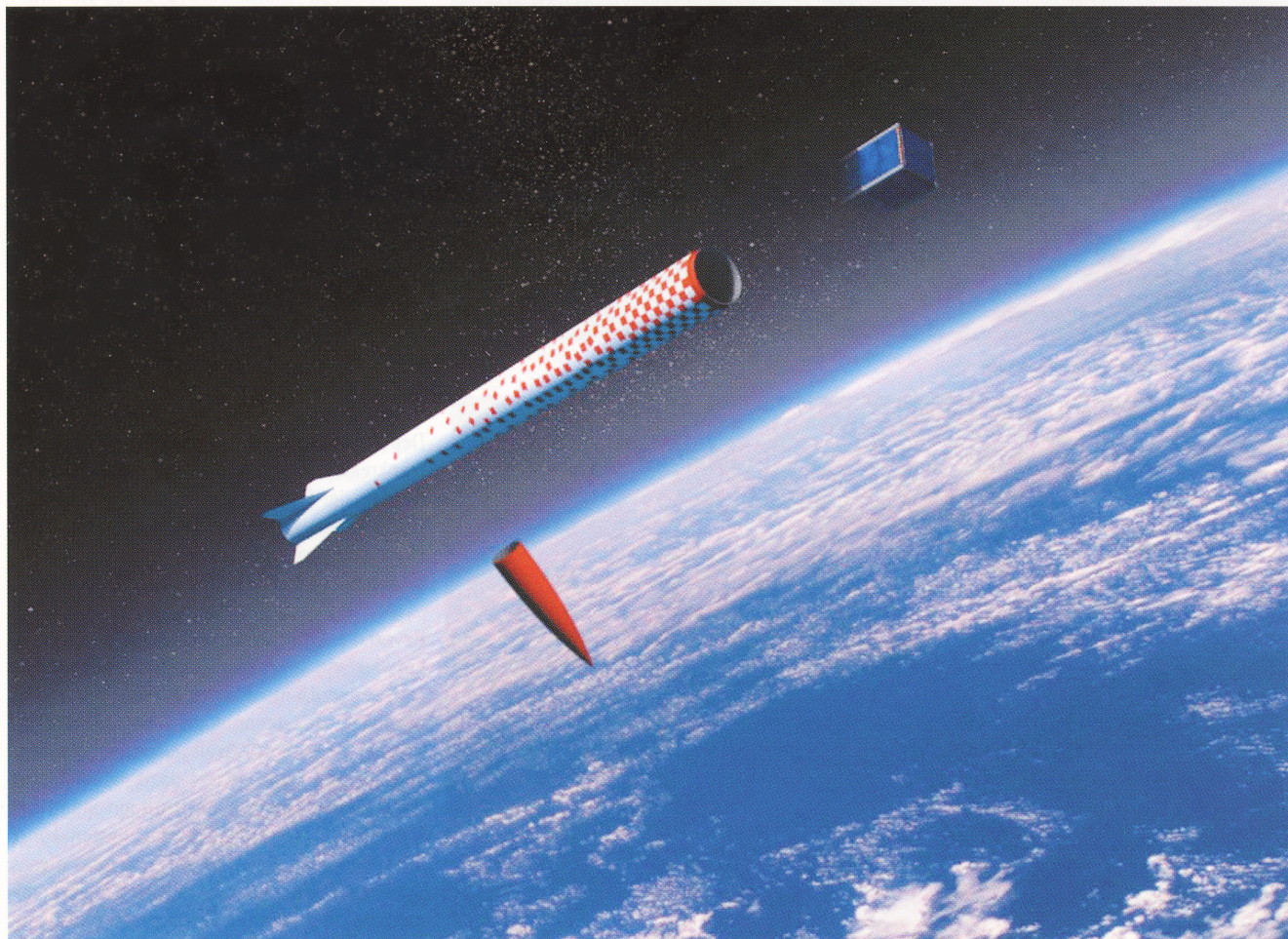


# Per Schienenkanone ins All (Teil 2 und Schluss)

## Blitzschnell und günstig in den Orbit

Von Dr.-Ing. Ognjan Božić und Jörg Behrens



In den letzten Jahren hat sich ein interessanter Trend herausgebildet, nämlich dass auch die Länder, die bisher keine Weltraumforschung betrieben haben, auf diesem Gebiet eigene Kapazitäten aufbauen und kleine Satelliten entwickeln.

Die zunehmende Miniaturisierung eröffnet dabei zusätzlich die Möglichkeit, sehr leistungsfähige Kleinsatelliten zu konzipieren, die ein breites Spektrum von verschiedensten Anwendungsbereichen abdecken. Diese Piko-, Nano- und Mikro-Satelliten mit Startmassen von 1 bis 50 kg bereiten dabei oft den Weg für neue innovative und aufwändigere Raumfahrtmissionen.

Wegen der sehr hohen Startpreise von Trägerraketen werden diese kleinen Satelliten üblicherweise nie einzeln gestartet, sondern in der Regel nur als Passagiere zweiter Klasse ("piggy-back"), d.h. als Zusatznutzlast zu

einem großen Satelliten. Für die Kleinsatelliten bietet diese Art des Transports wenig Vorteile, dafür aber viele Nachteile: Die Startkosten sind in der Regel sehr gering, dafür besteht allerdings kaum ein Einfluss auf die Startzeit und den Orbit, in dem sie ausgesetzt werden. Zusätzlich stoßen diese Kleinsatelliten wegen möglicher Sicherheitsbedenken bei den Betreibern der primären Nutzlast auf Vorbehalte und auch die Startdienstleister sind kaum an der Integration und der Missionsunterstützung wegen des damit verbundenen geringen Finanzvolumens interessiert.

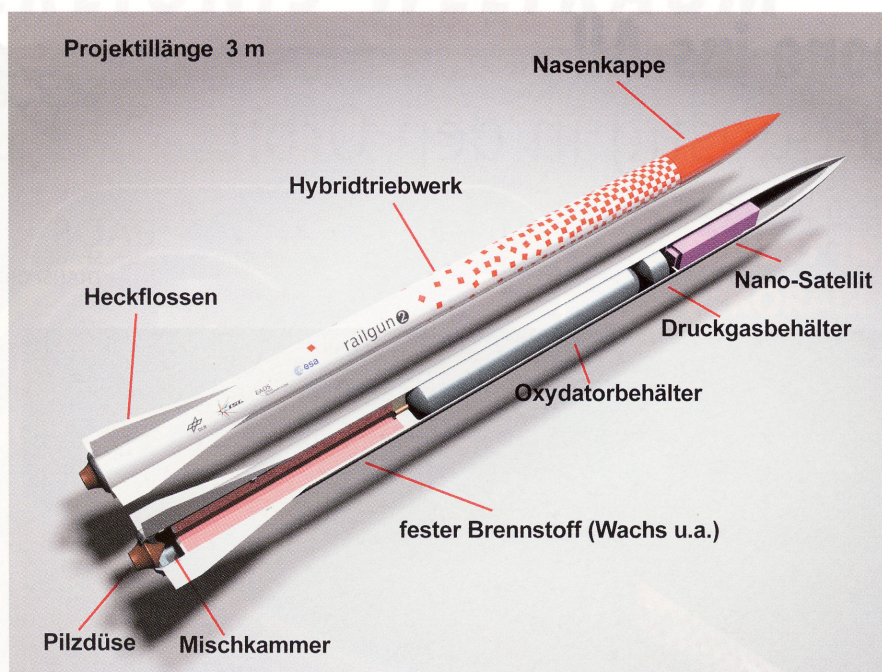
Um auf diesen sich entwickelnden Markt der Kleinsatelliten zu reagieren, wird bereits eine Reihe von möglichen Lösungen angeboten: "piggy back"-Starts mit großen Raketen (z.B. Ariane, Delta), Starts von Unterschalltransportflugzeugen (Pegasus) oder Verwendung von ehemaligen Atomraketen (ICBMs), wie der russischen Wolna oder Shtil.

Alternativ dazu werden Konzepte untersucht, die kleine Trägerraketen von Überschallkampfflugzeugen starten oder die mit Ballon-Plattformen in die Stratosphäre gebracht und von dort gestartet werden, alle mit dem Ziel, diese Satellitenklassen wesentlich kostengünstiger und schneller in den Orbit zu transportieren.

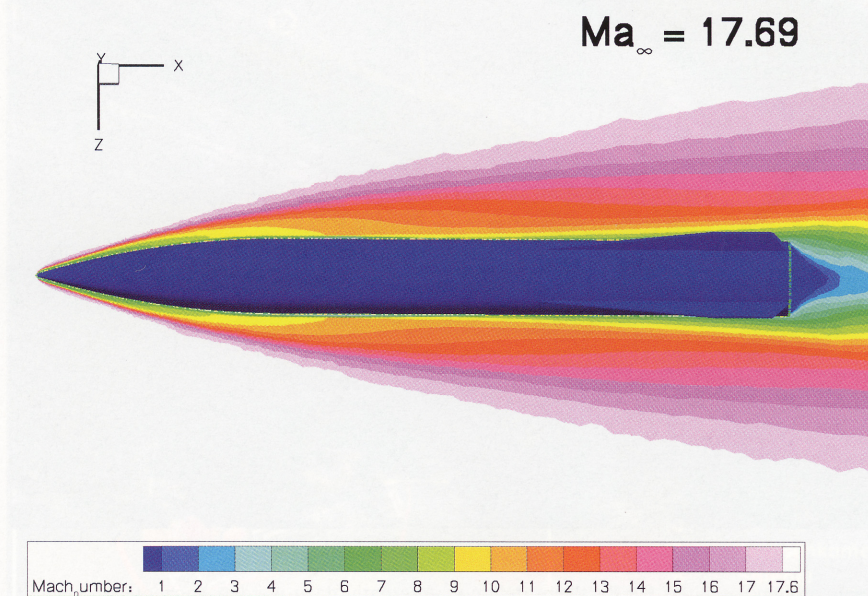
Als eine gute und interessante Alternative bietet sich dabei auch eine Kanone bzw. ein Katapult an. Der größte Vorteil einer solchen Lösung ist, dass das gesamte Startsystem auf der Erdoberfläche bleibt, d.h. es ist wiederverwendbar und die Kosten für den Transport werden minimiert. Erste viel versprechende Versuche dazu wurden bereits in den sechziger Jahren von dem Kanadier Gerald Bull im Rahmen des HARP-Projektes mit großen Artilleriekanonen durchgeführt, die aber nicht weiter verfolgt wurden.

Unter den verschiedenen Kanonenbeschleu-





Einstufiger Raketenträger für Nano-Satelliten.



Machzahlverteilung um das Projektil am Startpunkt.

nigern (chemische, mehrstufige Leichtgas-kanonen, Druckwellenbeschleuniger, Induktionsschleudern u.a.) verspricht die elektromagnetische Schienen-Kanone (Railgun) die besten Eigenschaften: Eine Verfügbarkeit unabhängig von Wetterbedingungen, hohe Startfrequenzen, niedrige Wartungs- und Lagerkosten resultieren in niedrigen Startkosten, zusätzlich sind die Personalsicherheit und die gute Umweltverträglichkeit weitere klare Argumente für ein solches Startkonzept.

Allerdings sind mit der Entwicklung eines solchen neuen Systems auch einige offene Fragen verbunden:

Neben der Gravitation muss ein Projektil beim Start in den erdnahen Orbit (LEO) den immensen Luftwiderstand der unteren Erdatmosphäre

(bis ca. 42 km) überwinden. Ein aerodynamisch optimal geformtes Projektil muss dabei rein theoretisch über eine Startgeschwindigkeit von mehr als 10,6 km/sec verfügen, um die für einen Satelliten erforderliche Orbitalgeschwindigkeit von 8 km/sec zu erreichen. Obgleich ein Projektil in diesem Fall die Atmosphäre in ca. 10 Sekunden durchdringen würde, entwickeln sich durch Reibungsdefekte auf der Nasenkappe und an den Forderkanten der Heckflossen Temperaturen, denen kein bisher bekanntes Material widerstehen könnte.

Ein weiteres Problem ist die Kanonenlänge: Bei einer Begrenzung der Kanone beispielsweise auf gut 100 m benötigt man Beschleunigungen, die größer sind als 20.000 g, um die erforderlichen Startgeschwindigkeiten zu erreichen. Allerdings ist die Auswahl der

Konstruktionsmaterialien, die über eine entsprechende Festigkeit verfügen, um diesen hohen Kräften zu widerstehen, sehr gering. Zusätzlich haben bisherige Untersuchungen gezeigt, dass die Gleitkontakte zwischen den Plasma-Armaturen des Projektils und den Kanonenschienen bei einer Stromstärke von mehreren Millionen Ampere und einer Geschwindigkeit von mehr als 6 km/sec den Strom schlecht leiten. Somit ist bei Hyperschall-Railguns die erreichbare Projektil-Geschwindigkeit in dem Rohr durch Ablation, verursacht durch immense turbulente konvektive Wärmeübertragung, limitiert. Bis jetzt ist es nur wenigen Forschern gelungen, Projektile mit einem Gewicht von wenigen Gramm auf mehr als 7 km/sec zu beschleunigen.

An diesem Diskussionspunkt kann man berechtigt die Frage stellen, ob die ganze Idee überhaupt vertretbar ist. Die Antwort ist positiv – aber man sollte andere, geänderte Lösungswege verfolgen.

EADS SPACE Transportation in Bremen, das DLR-Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik in Braunschweig und das Deutsch-Französische Institut Saint Louis in Frankreich untersuchen zurzeit gemeinsam im Auftrag der Europäischen Raumfahrt Agentur (ESA) die Anwendungsmöglichkeiten eines solchen Konzepts für den Start von Kleinsatelliten (siehe auch RC 34/35).

Bevor die Entscheidung über die endgültige Entwicklung eines Railgun-Startsystems getroffen wird, müssen zusätzlich Antworten bezüglich der technologischen Machbarkeit und der Wirtschaftlichkeit aufgezeigt werden. Eine weitere Frage gehört dazu, nämlich was das Railgun-System beim heutigen Stand der Technik und Kenntnis maximal leisten kann, d.h. wo sind die Leistungsgrenzen dieses Systems. Um darauf eine Antwort zu bekommen, wird ein solches Visionssystem ausgearbeitet, welches im Anschluss an eine Lösung für den Start von Nano-Satelliten in die Erdumlaufbahn vorgestellt und diskutiert werden soll.

## Railgun für den Start von Nano-Satelliten in der Erdumlaufbahn

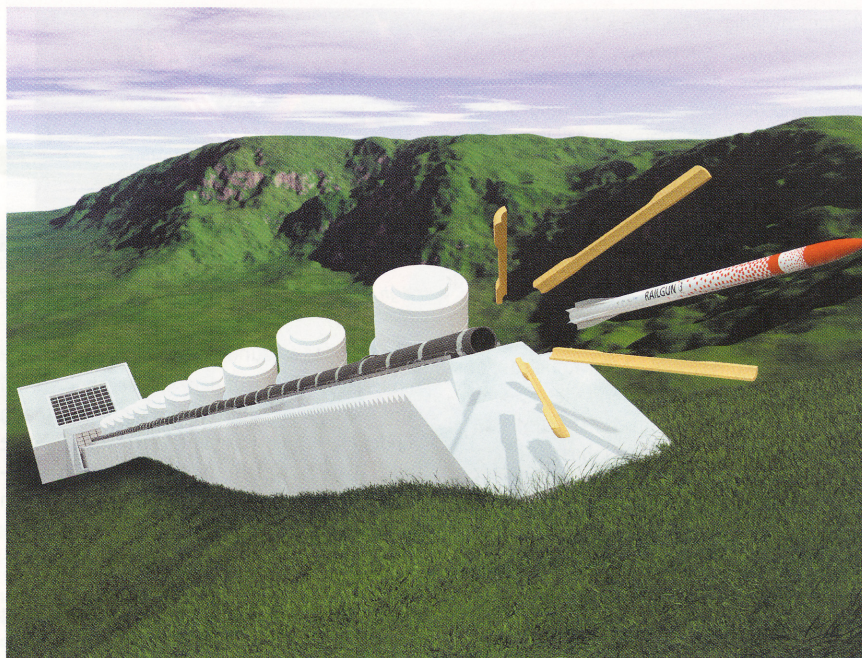
Generell besteht bei der ESA ein Interesse an einem Railgun-Startkonzept, das sehr kleine Satelliten, wie beispielsweise die 1 kg schweren Cubesats (siehe auch im Internet [http://cubesat.calpoly.edu/\\_new/index.html](http://cubesat.calpoly.edu/_new/index.html)), in eine niedrige Erdumlaufbahn (LEO) befördern kann. Um die damit verbundenen Anforderungen zu untersuchen, wurde ein grundlegendes Konzept entwickelt.

Nach heutiger Vorstellung soll die "Electromagnetic Railgun" 180 m lang werden, um ein Projektil mit einem Gesamtgewicht von 50 kg und einer Nutzlast von einigen Kilogramm in den LEO zu schießen. Mächtige Konden-

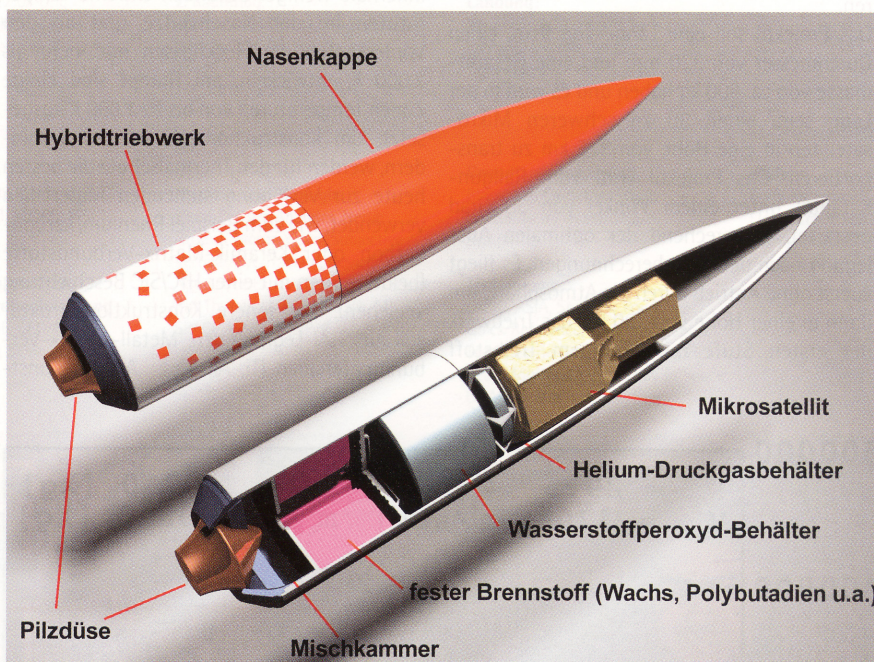


satorspeicher werden innerhalb von 51 Millisekunden die elektrische Energie von 3,4 GigaJoule liefern und das Raketengeschoss vom Ruhezustand bis auf 6.000 m/sec beschleunigen. Dabei sollen die Konstruktionselemente und die Nutzlast des Projektils einer Beschleunigung von 10.000 g ausgesetzt werden. Um die notwendige Orbitalgeschwindigkeit zu erreichen ist zusätzlich in dem Projektil ein Triebwerk integriert, welches am höchsten Punkt der ballistischen Flugbahn des Projektils in einer Höhe von ca. 380 km gezündet wird. Das Projektil selbst wird 3 m lang sein und einen Durchmesser von 120 - 150 mm haben. Die Materialien für seine Grundkonstruktion, wie z.B. Metall-Matrix-Composite (MMC) o.ä., werden höchste Ansprüche auf Festigkeit erfüllen müssen. Dabei wird zusätzlich großer Wert auf ein sehr niedriges Eigengewicht sowie Widerstandsfähigkeit gegen Plasma-Korrosion wie auch auf niedrige elektrische und thermische Leitfähigkeit gelegt. Bisher können nur mehrschichtige Sandwich-Strukturen mit heterogenen Eigenschaften solch widersprüchliche Anforderungen erfüllen.

Nachdem das Projektil den Beschleuniger verlassen hat, gehen die hohen Belastungen seiner Konstruktionsstruktur weiter. Erste Flugbahnberechnungen fordern, dass die Rakete mit einem spitzen Winkel von 31 Grad und einer Geschwindigkeit, die der Machzahl 17,7 entspricht, starten soll. Ein solch kraftvoller Start ermöglicht der Rakete ein Durchdringen der dichten Erdatmosphärenschichten bis 42 km in weniger als 17 Sekunden. Dabei entwickeln sich allerdings durch die Reibung in der Atmosphäre hohe Wärmelasten und folglich treten an der Oberfläche der Rakete extreme Temperaturen auf. Falls die an der Oberfläche auftretende Wärme in die innere Konstruktion eindringen würde, würde die ganze Rakete innerhalb der ersten 10 Sekunden des Fluges vollständig vernichtet werden. Besonders gefährdet sind dabei die Nasenspitze und die Heckflossen, die der aerodynamischen Stabilisierung dienen. Dort werden Oberflächentemperaturen von über 3.000 °C erwartet. Um Schäden dadurch wie auch durch begleitende aktive Oxidation der Oberfläche zu verhindern, könnten diverse Thermoschutzmethoden zur Anwendung kommen. Diese basieren beispielsweise auf aktiver Kühlung, passivem Thermalschutz, Strahlungskühlung und Ablation, welche für verschiedene Oberflächenbereiche unterschiedlich miteinander gekoppelt werden müssen. So soll die Nasenspitze und die Vorderkante der Heckflossen aus einer mehrschichtigen Struktur aufgebaut werden, die ein Ablationsmaterial als äußere Schicht und einen passiven Thermalschutz als mittlere Schicht besitzt. Die beiden Schichten sollen auf einer Basisstruktur aus MMC oder ähnlichem befestigt werden. Für die Projektiloberfläche im Bereich des Triebwerks könnte eine Film- oder Effusionskühlung, kombiniert mit einer soliden inneren Isolierung, eine akzeptable Konstruktions-



"High End" RAILGUN-Katapultanlage inklusive Stromversorgung.



"High End" Mikro-Satellitenträger - II. Stufe mit der Nutzlast.

lösung sein. Das Triebwerk selbst, mit einer kompakten Pilzdüse am Ausgang, basiert auf einem Hybridtriebwerk, welches mit einem festen Brennstoff (Wachs, Polybutadien u.ä.) und einem flüssigen Oxidationsmittel (z.B.  $H_2O_2$ , HAN,  $N_2O_4$ ) betrieben wird. Ein solches Triebwerk ist relativ einfach, explosionsicher, zuverlässig und ist trotz niedrigem Schubniveau gut geeignet als Kickoff-Triebwerksstufe.

Um ein solches Hightech-Projektil zu bauen, sind weitere Fortschritte z.B. in der Materialforschung wie auch im Leichtstruktur-Bau gefordert, die sich aber bereits heute in der Entwicklung befinden. Schon allein deswegen könnte es ein interessanter Technologie-demonstrator und Vorreiter für andere Anwendungen werden.

## Die "High End" Railgun

Bisherige Railgun-Projekte sind ausschließlich militärisch orientiert und nutzen zur Erhöhung der Einsatzmobilität ein möglichst kurzes Kanonenrohr. Zum Erreichen hoher Austrittsgeschwindigkeiten sind somit zwangsläufig auch extreme Beschleunigungen bis zu 100.000 g erforderlich. Auch sind der Projektildurchmesser (zwischen 50 und 200 mm) bzw. die Projektilform limitiert, um einen optimalen Wirkungsgrad des Railgun-Beschleunigers zu erhalten. Um dies an die Anforderungen für den Start von Kleinsatelliten anzupassen, bietet sich hier ein weiterer Weg über ein sogenanntes Railgun-Katapult an:

Dieses Konzept besteht aus einem Katapult und einem Projektil mit eigenem Antrieb. Durch diese Kombination ist es möglich, die



Startgeschwindigkeit des Projektils auf ca. 4 km/sec zu begrenzen, allerdings erhöht sich die Projektilmasse. Die Differenz zwischen der Start- und der notwendigen Orbitalgeschwindigkeit wird durch den zusätzlichen Raketenantrieb ausgeglichen. Wegen der großen Katapultlänge (maximal 470 m) ist die Beschleunigung des Projektils aber kleiner als 2.000 g. Dies ist ungefähr der dreifache Wert dem moderne Raketengeschosse, die heute für militärische Zwecke benutzt werden, ausgesetzt sind. Somit bleiben auch die Anforderungen für die Festigkeit der Konstruktionsstoffe des Projektils während der Beschleunigungsphase (am Katapult) und unter Wärmebelastung in der Flugphase (Reibungs- und Druckwiderstandseffekte) im realistischen Bereich.

Das Railgun-Katapult ist innerhalb einer im Halbkreis geformten Röhre aus Leichtbau installiert. Die Luft aus der Röhre selbst ist evakuiert, um den Luftwiderstand und die Wärmebelastung am Raketenprojekttil während der Beschleunigungsphase zu minimieren.

Das Projektil soll eine Länge von 9 m, einen Durchmesser von 320 mm und eine Gesamtmasse von ca. 800 kg haben und es wird in der Lage sein, einen 30 kg schweren Mikrosatelliten in eine Höhe von 375 km zu transportieren. Das Projektil wird vom Railgun-Katapult unter einem Winkel von 30 Grad gestartet, entsprechend der optimalen Auslegung nach den Bahnberechnungen. Es fliegt zuerst ohne Antrieb durch die Atmosphäre, um dann in einer Höhe von 100 km das Triebwerk der ersten Stufe mit flüssigem Treibstoff

(LO<sub>2</sub>/Kerosin) zu zünden, welches nach Brennschluss ca. 80 Sekunden später abgeworfen wird. Kurz vor dem Scheitelpunkt der Flugbahn zündet das Hybrid-Raketentriebwerk der 2. Stufe (mit Wachs als Brennstoff und Wasserstoffperoxyd als Oxidator) und bringt den Satelliten dann in seine endgültige orbitale Umlaufbahn.

Generell wird auch bei diesem Katapult-Start der Thermalschutz des Projektils als grundlegend wichtig erachtet, da sich nach dem Start innerhalb weniger Sekunden extreme Temperaturen an der Nasenspitze und an den Vorderkanten der Heckflossen mit mehr als 2.000 K entwickeln, am Rumpf sind einige Zonen Temperaturen von bis zu 1.600 K ausgesetzt. Um Konstruktionsschäden zu verhindern, werden für den Thermalschutz die besten heute zur Verfügung stehenden Materialien verwendet, wie zum Beispiel Rhenium/Karbon-Karbon oder Keramik-Matrix-Verbundstoffe (beide werden mit einer HfC/SiC Beschichtung versehen). Die innere Konstruktionsstruktur soll aus TiAl-Legierungen, Metall-Matrix-Verbundmaterialien (Ti, Al, Mg), Aramid-Kunst-

stoffen und ähnlichen Materialien erstellt werden. Für den Bau eines solchen Kleinsatellitenträgers sind bereits heute alle notwendigen Kenntnisse und Technologien verfügbar.

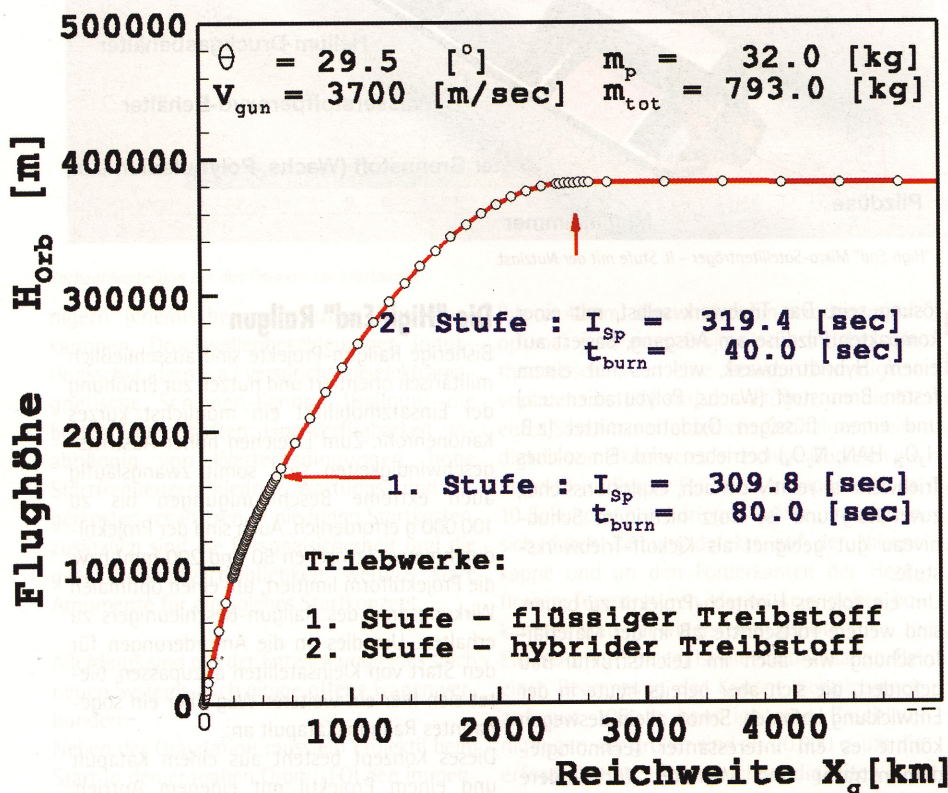
## Das Energieversorgungssystem

Bei beiden diskutierten Railgun-Anwendungen wird zusätzlich ein besonderes Augenmerk auf die Stromversorgung gelegt, denn sie muss in der Lage sein, große Energiemengen in sehr kurzer Zeit zu liefern. Bis jetzt wurden Railguns durch Batterien, Kondensatorbanken, Kompulsatoren ("kompensierter pulsierender Generator") und homopolare Generatoren (HPG) mit Energie versorgt. Für die Anwendung als Startsystem für Satelliten benötigt eine Railgun solch enorme Energiemengen, die allerdings nur von Kondensatoren oder HPGs in der entsprechend kurzen Zeit geliefert werden können. Während Kondensatoren mit Kosten von 0,1 €/J immer noch sehr teuer sind, bieten sich als alternative Lösung HPGs gekoppelt mit großen Induktor-Speichern an. An der 'Australian National University' in Canberra wurde schon im Jahr 1962 ein homopolarer Generator mit 550 Megajoule gebaut und erfolgreich über 20 Jahre betrieben. Auch er hat eine Railgun versorgt, die bereits kleine Geschosse auf 5,9 km/sec beschleunigen konnte. Daher wird eine Kette von 30 bis 40 HPGs als potenzielle Energiequelle für diese großen Startsysteme als die beste Lösung angesehen.

## Fazit

Alternativen zu Raketen mit chemischen Treibstoffen sind längst überfällig. Ein interessanter und viel versprechender Weg für den dedizierten und kostengünstigen Start von Kleinsatelliten verspricht der Einsatz eines elektromagnetischen Schienenbeschleunigers zu sein. Dieses Startsystem besitzt weiterhin den Charme, einen tatsächlichen Einstieg in die heute viel diskutierten, wiederverwendbaren Raumtransportsysteme zu machen.

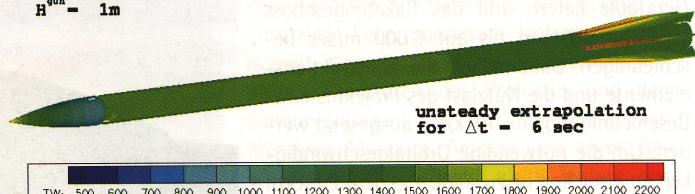
Vorhergehender Beitrag in RC 34/35.



Missionsprofil für "High End" Raketengeschoss.  
Fotos und Grafiken: DLR - AS Braunschweig, EADS - Space Transportation.

$M_a = 10.83$   
 $V_{gun} = 3650 m/sec$   
 $H_{gun} = 1m$

SURFACE TEMPERATURE DISTRIBUTION  $T_w$



"High End" RAILGUN-System - Temperaturverteilung an der Projektiloberfläche nach einer Flugzeit von 6 sec (nichtstationäre Extrapolation).